

УДК 621.372.6

ШЕСТИВХОДОВОЕ УСТРОЙСТВО НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ В ПОДЛОЖКУ ВОЛНОВОДОВ

Т. Х. БОУАЗЗА¹, К. НОУРИ, ДЖ. ТАО², Б. С. БОУАЗЗА¹ И Т.-Х. ВУОНГ²

¹Университет Тахара Моулая,
Алжир, Саида, 20000

²ENSEEIHТ,
Франция, Тулуза, 31071

Аннотация. В статье представлена новая конструкция шестивходового устройства на основе многослойных интегрированных в подложку волноводов SIW (substrate integrated waveguides). Эта конструкция основана на использовании многослойной структуры с целью уменьшения размеров устройства при сохранении рабочих характеристик реализуемого компонента. Разработанное шестивходовое устройство на базе SIW состоит из двух базовых элементов: делителя мощности SIW и направленного ответвителя. Эти два элемента спроектированы, оптимизированы и согласованы для получения улучшенных рабочих характеристик на рабочей частоте 11 ГГц. Результаты моделирования показали, что новое шестивходовое устройство на базе многослойного SIW обладает хорошими рабочими характеристиками, в частности хорошим уровнем обратных потерь, развязкой более –20 дБ, и величиной коэффициента передачи выше –10 дБ. Преимуществом этого SIW устройства являются малые размеры 160×34,8 мм, ширина данного устройства примерно на 50% меньше, чем у планарного шестивходового SIW устройства, что позволяет достичь более высокой плотности интеграции в телекоммуникационных системах и планировать создание устройств с меньшими размерами. Переход от микрополосковой линии к SIW используется для облегчения интеграции этого компонента в другие планарные устройства. Указанные структуры спроектированы, промоделированы и оптимизированы с помощью программного обеспечения Ansoft HFSS.

Ключевые слова: шестивходовый SIW; интегрированный в подложку волновод; многослойный; ответвитель; делитель мощности

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время исследовались различные многосходовые компоненты [1–5], которые могут представлять интерес для разработчиков и стремятся удовлетворить постоянно растущие ожидания, возлагаемые на СВЧ устройства.

Шестивходовое устройство представляет собой пассивную линейную СВЧ цепь. Ее разработка продолжалась в течение последних 40 лет для измерительных приложений СВЧ диапазона и диапазона миллиметровых волн [6].

Многочисленные архитектуры шестивходовых радиоустройств были предложены для разработки дешевых и высокоэффективных трансиверов с прямым преобразованием и характеристиками, определяемыми программным обеспечением (ПО), которые привлекательны для пользователей, поскольку обеспечивают хорошие рабочие характеристики, связанные с потребляемой мощностью, линейностью и шумом системы, а также расходами на проектирование и изготовление.

Шестивходовое устройство может быть построено в виде гибридных частей либо в

DOI: [10.20535/S0021347018020036](https://doi.org/10.20535/S0021347018020036)

© Т. Х. Боуазза, К. Нури, Дж. Тао, Б. С. Боуазза и Т.-Х. Вуонг, 2018

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kobrin, K. V.; Manuilov, M. B.; Sinyavsky, G. P. "Field-theory analysis and design of multiport branch-guide couplers for contoured beam antennas," *Proc. of Int. Conf. on Antenna Theory and Tech.*, ICATT, 9-12 Sept. 2003, Sevastopol, Ukraine. IEEE, 2003, pp. 769-771, 2003. DOI: [10.1109/ICATT.2003.1238861](https://doi.org/10.1109/ICATT.2003.1238861).
2. Kantartzis, N. V.; Gatzianas, M.; Kosmanis, T. I.; Tsiboukis, T. D. "Analysis of multiport waveguide structures by a higher-order FDTD methodology based on non-orthogonal curvilinear grids," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 20-24 May 2001, Phoenix, AZ, USA. IEEE, 2001, pp. 2051-2054. DOI: [10.1109/MWSYM.2001.967315](https://doi.org/10.1109/MWSYM.2001.967315).
3. Wessel, W.; Sieverding, T.; Arndt, F. "Mode-matching analysis of general waveguide multiport junctions," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 13-19 Jun. 1999, Anaheim, CA, USA. IEEE, 1999, pp. 1273-1276. DOI: [10.1109/MWSYM.1999.779619](https://doi.org/10.1109/MWSYM.1999.779619).
4. Bialkowski, M. E. "Analysis of an N-port consisting of a radial cavity and E-plane coupled rectangular waveguides," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 40, No. 9, pp. 1840-1843, Sep. 1992. DOI: [10.1109/22.156613](https://doi.org/10.1109/22.156613).
5. Yeo, S. P.; Qiao, L.; Cheng, M. "Symmetrical N-port waveguide junction loaded with dielectric sleeve and metallic post," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*,

Vol. 43, No. 6, pp. 1298-1302, Jun. 1995. DOI: [10.1109/22.390186](https://doi.org/10.1109/22.390186).

6. Engen, G. F. "The six-port reflectometer: An alternative network analyzer," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 25, No. 12, pp. 1075-1080, Dec. 1977. DOI: [10.1109/TMTT.1977.1129277](https://doi.org/10.1109/TMTT.1977.1129277).

7. Urbanec, T. "Special methods for microwave vector measurements," *Ph.D. Thesis, Dept. of Radio Electronics, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic*, 2007.

8. Deslandes, D.; Wu, K. "Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form," *IEEE Microwave Wireless Components Lett.*, Vol. 11, No. 2, pp. 68-70, Feb. 2001. DOI: [10.1109/7260.914305](https://doi.org/10.1109/7260.914305).

9. Uchimura, H.; Takenoshita, T.; Fujii, M. "Development of a 'laminated waveguide'," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 46, No. 12, pp. 2438-2443, Dec. 1998. DOI: [10.1109/22.739232](https://doi.org/10.1109/22.739232).

10. Hirokawa, J.; Ando, M. "Single-layer feed waveguide consisting of posts for plane TEM wave excitation in parallel plates," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 46, No. 5, pp. 625-630, May 1998. DOI: [10.1109/8.668903](https://doi.org/10.1109/8.668903).

11. Grigoropoulos, N.; Sanz-Izquierdo, B.; Young, P. R. "Substrate integrated folded waveguides (SIFW) and filters," *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, Vol. 15, No. 12, pp. 829-831, Dec. 2005. DOI: [10.1109/LMWC.2005.860027](https://doi.org/10.1109/LMWC.2005.860027).

12. Chen, J.; Hong, W.; Chen, X.; Yan, P.; Lai, Q.; Wu, K. "An LTCC X-band receiver front-end using embedded multilayer substrate integrated waveguide filter," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, Vol. 50, No. 2, pp. 285-287, 2008. DOI: [10.1002/mop.23057](https://doi.org/10.1002/mop.23057).

13. Eom, D.-S.; Byun, J.; Lee, H.-Y. "Multilayer substrate integrated waveguide four-way out-of-phase power divider," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 57, No. 12, pp. 3469-3476, Dec. 2009. DOI: [10.1109/TMTT.2009.2034311](https://doi.org/10.1109/TMTT.2009.2034311).

14. Hong, W.; Liu, B.; Wang, Y.-Q.; Lai, Q.-H.; Tang, Hongjun; Yin, Xiao Xin; Dong, Yuan Dan; Zhang, Yan; Wu, K. "Half mode substrate integrated waveguide: a new guided wave structure for microwave and millimeter wave application," *Proc. of Joint 31st Int. Conf. on Infrared Millimeter Waves and 14th Int. Conf. on Terahertz Electronics*, 18-22 Sept. 2006, Shanghai, China, IEEE, 2006, p. 219. DOI: [10.1109/ICIMW.2006.368427](https://doi.org/10.1109/ICIMW.2006.368427).

15. Ali, A. A. M.; Fonseca, N. J. G.; Coccetti, F.; Aubert, H. "Design and implementation of two-layer compact wideband Butler matrices in SIW technology for Ku-band applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 59, No. 2, pp. 503-512, Feb. 2010. DOI: [10.1109/TAP.2010.2093499](https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2093499).

16. Lee, J.-H.; Pinel, S.; Papapolymerou, J.; Laskar, J.; Tentzeris, M. M. "Low-loss LTCC cavity filters using system-on-package technology at 60 GHz," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 53, No. 12, pp. 3817-3824, Dec. 2005. DOI: [10.1109/TMTT.2005.859864](https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.859864).

17. Hoer, C. A. "The six-port coupler: A new approach to measuring voltage, current, power, impedance, and phase," *IEEE Trans. Instrum., Meas.*, Vol. 21, No. 4, p. 466–470, 1972. DOI: [10.1109/TIM.1972.4314068](https://doi.org/10.1109/TIM.1972.4314068).

18. Moldovan, Emilia; Tatu, Serioja-Ovidiu; Gaman, Tamara; Wu, Ke; Bosisio, R. G. "A new 94-GHz six-port collision-avoidance radar sensor," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 52, No. 3, p. 751–759, Mar. 2004. DOI: [10.1109/TMTT.2004.823533](https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.823533).

19. Tatu, Serioja Ovidiu; Moldovan, Emilia; Wu, Ke; Bosisio, Renato G. "A new direct millimeter-wave six-port receiver," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 49, No. 12, p. 2517–2522, Dec. 2001. DOI: [10.1109/22.971644](https://doi.org/10.1109/22.971644).

20. Xu, X. Y. "Software defined radio receiver platform based on six-port technology," Doctoral Diss. Ecole Polytechnique Montreal, Canada, 2006. ISBN: 978-0-494-20839-7.

21. Xu, X.; Bosisio, R. G.; Wu, K. "A new six-port junction based on substrate integrated waveguide technology," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 53, No. 3, pp. 2267–2272, Jul. 2005. DOI: [10.1109/TMTT.2005.850455](https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.850455).

22. Liu, B.; Hong, W.; Wang, Y.-Q.; Lai, Q.-H.; Wu, K. "Half mode substrate integrated waveguide (HMSIW) 3-dB coupler," *IEEE Microwave Wireless Components Lett.*, Vol. 17, No. 1, pp. 22–24, Jan. 2007. DOI: [10.1109/LMWC.2006.887244](https://doi.org/10.1109/LMWC.2006.887244).

23. Li-nan, W.; Xu-chun, Z.; Chuang-ming, T.; Ming, Z. "A new substrate integrated waveguide six-port circuit," *Proc. of Int. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology, ICMMT*, 8–11 May 2010, Chengdu, China. IEEE, 2010, p. 59–61. DOI: [10.1109/ICMMT.2010.5525288](https://doi.org/10.1109/ICMMT.2010.5525288).

24. "Microwave Encyclopedia", <http://www.microwaves101.com/encyclopedia/siw.cfm>, <http://www.microwaves101.com/encyclopedia/waveguidemath.cfm>

25. Germain, S.; Deslandes, D.; Wu, K. "Development of substrate integrated waveguide power dividers," *Proc. of Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering*, 4–7 May 2003, Montreal, QC, Canada. IEEE, 2003, vol. 3, pp. 1921–1924. DOI: [10.1109/CCECE.2003.1226289](https://doi.org/10.1109/CCECE.2003.1226289).

26. Levy, R. "Improved single and multiaperture waveguide coupling theory, including explanation of mutual interactions," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 28, No. 4, pp. 331–338, Apr. 1980. DOI: [10.1109/TMTT.1980.1130073](https://doi.org/10.1109/TMTT.1980.1130073).

27. Cassivi, Y.; Deslandes, D.; Wu, K. "Substrate integrated waveguide directional couplers," *Proc. of Asia-Pacific Microwave Conf.*, Kyoto, Japan, 19–22 Nov. 2002.

28. Bouazza, T. H. C.; Nouri, K.; Bouazza, B. S.; Damou, M.; Becharef, K. "Multilayer substrate integrated waveguide directional coupler," *Int. J. Microwave Optical Technol.*, Vol. 11, No. 4, p. 245–250, July 2016. URI: <http://www.ijmot.com/VOL11NO4.ASPX>.

29. Kramer, O.; Djerfati, T.; Wu, K. "Dual-layered substrate-integrated waveguide six-port with wideband double-stub phase shifter," *IET Microwaves Antennas Propag.*, Vol. 6, No. 15, pp. 1704–1709, 2012. DOI: [10.1049/iet-map.2012.0272](https://doi.org/10.1049/iet-map.2012.0272).

30. Doghri, A.; Djerfati, T.; Ghiotto, A.; Wu, K. "Broadband substrate-integrated-waveguide six-port applied to the development of polarimetric imaging radiometer," *Proc. of 41st European Microwave Conf.*, EuMC, 10–13 Oct. 2011, Manchester, UK. IEEE, 2011. DOI: [10.23919/EuMC.2011.6101963](https://doi.org/10.23919/EuMC.2011.6101963).

31. Ding, Y.; Wu, K. "Half-mode substrate integrated waveguide six-port front-end circuits for direct-conversion transceiver design," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 1502– June 2008, Atlanta, GA, USA. IEEE, 2008. DOI: [10.1109/MWSYM.2008.4633267](https://doi.org/10.1109/MWSYM.2008.4633267).

32. Chen, J.; Hong, W.; Yan, P.; Liu, B.; Wang, Y.; Wu, K. "Design of a six-port junction using half-mode substrate integrated waveguide," *Proc. of Asia-Pacific Microwave Conf.*, 11–14 Dec. 2007, Bangkok, Thailand. IEEE, 2007. DOI: [10.1109/APMC.2007.4554870](https://doi.org/10.1109/APMC.2007.4554870).

33. Abdulhadi, A. E.; Suntives, A.; Abhari, R. "Design of a SIW-based data communication system using a SIW six-port receiver," *Proc. of IEEE 18th Conf. on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems*, 19–21 Oct. 2009, Portland, OR, USA. IEEE, 2009. DOI: [10.1109/EPEPS.2009.5338454](https://doi.org/10.1109/EPEPS.2009.5338454).

Поступила в редакцию 24.11.2016

После переработки 15.01.2018